1A

УДК 681.518.5; 621.384.3

С.С. Анцыферов
Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), г. Москва, Россия
Antsyfer@yandex. ru.

Метрология интеллектуальных систем

В статье рассмотрены системные принципы метрологического обеспечения проектирования систем с элементами искусственного интеллекта. Структурно-стохастический принцип аппроксимации информации пространственно-временных полей обеспечивает преодоление существенной априорной неопределенности и высокие метрологические показатели по скорости адаптации, достоверности и устойчивости результатов.

Введение

При решении проблем, связанных с оценкой состояний широкого класса исследуемых объектов, с целью последующего принятия решений и выбора стратегии управления сложными процессами, все большее распространение получают методы, основанные на использовании информации полей различной физической природы. Значительное место среди этих полей занимают пространственно-временные поля, образуемые практически всеми объектами природной и техногенной среды в широком спектральном диапазоне. Путем использования информации пространственно-временных полей решаются такие задачи, как оценка качества теплоизоляции объектов с энергетической установкой, экологический мониторинг окружающей среды, медицинская диагностика и др. По мере расширения круга решаемых задач и их усложнения, к системам обработки информации полей предъявляются все более жесткие требования по основным метрологическим показателям их эффективности: высокая достоверность при ограниченном времени получения конечных результатов, устранение фактора субъективности при принятии решений, быстрая адаптируемость к новым задачам, высокая устойчивость результатов.

Физические поля большого числа технических и медицинских объектов довольно разнообразны и сложны по своей структуре, а поэтому, как правило, требуют для интерпретации и последующего принятия решений специалистов высокой квалификации. Высококвалифицированные специалисты при анализе информации полей быстро утомляются, что в условиях дефицита времени приводит к недопустимому возрастанию числа ошибочных решений. Особенно проблематична безошибочная интерпретация оператором изменяющихся во времени реализаций полей, т.е. при проведении динамических наблюдений. Создание же автоматизированных систем, требующих предварительной настройки, связано с длительными по времени процессами изучения структурных особенностей полей и установления корреляционных связей между структурой полей и состояниями исследуемых объектов, т.е. с накоплением базы знаний. Как показывает практика, такой «ручной» способ накопления знаний крайне неэффективен и поэтому часто происходит отказ от решения той или иной практической задачи.

В связи с этим актуальна проблема разработки принципов метрологического обеспечения адаптивного управления обработкой информации широкого класса пространственно-временных полей, обеспечивающего выполнение указанных требований в условиях существенной априорной неопределенности как о характере структуры

текущих реализаций полей и числе образуемых ими диагностических классов, так и об истинных состояниях исследуемых объектов. Суть данной проблемы сводится к созданию метрологического обеспечения методологии проектирования систем принципиального нового класса – адаптивных информационно-распознающих систем (АИРС), обеспечивающих возможность быстрого приобретения новых знаний о малоизученных процессах. При этом поля, отражающие различные состояния исследуемых объектов, предъявляются в режиме адаптации без указания принадлежности к тому или иному классу, а используемые в АИРС принципы управления обработкой должны обеспечить определение числа и характеристик образов полей в пространстве их представления (описания) практически в реальном масштабе времени. Указанная проблема является составной частью общей, фундаментальной проблемы, связанной с созданием математических моделей систем с элементами искусственного интеллекта. Особую остроту данная проблема приобретает при обработке информации пространственно-временных полей, обладающих сильно выраженной изотропностью и образующих значительные области взаимного перекрытия диагностических классов (образов).

Цель работы

Разработка системных принципов метрологического обеспечения адаптивного управления обработкой информации пространственно-временных полей.

Постановка задачи

Идентификационные признаки информации реализаций полей можно представить в виде изменяющихся во времени совокупностей пространственно ориентированных градиентов, образующих связные конфигурации разных размеров (площадей). Такое определение признаков делает возможным реализацию принципа измеримости информации полей. Однако при этом существует целый ряд факторов, оказывающих мешающее воздействие: сочетание, неоднозначность и инверсный характер различных признаков, маскирующий эффект структуры полей. Действие перечисленных факторов и приводит к образованию значительных областей взаимного перекрытия диагностических классов (образов), что, в свою очередь, определяет вероятностный (стохастический) характер виртуального пространства функционирования систем, а также принципов формализации процедур управления адаптацией и распознаванием образов полей.

Если в качестве общей модели измерений использовать дифференциальное уравнение вида:

$$\dot{B} = \varphi(B, S, U, t), \qquad (1)$$

где B – вектор значений измеренных параметров идентификационных признаков (вектор сообщений); S – вектор состояний исследуемого объекта; U – погрешность измерений, то оптимальная оценка вектора S, дающая решение задачи, будет определяться соотношением вида:

$$\hat{S}_t = M\left[S \middle| B_{t0}^t\right], \qquad (2)$$

$B_{t_0}^t$ – совокупность значений векторов сообщений в интервале времени $[t_0;t]$.

Практическое применение соотношения (2) связано с поиском апостериорного распределения S. Это очень сложная задача, решение которой в общем случае пока не найдено. Теоретически, согласно методам теории стохастических дифференциальных уравнений, для нахождения оптимальных оценок вектора состояний необходимо решить уравнение апостериорной плотности вероятности вектора состояния S после

получения результатов измерений. Решение о том, к какому из классов (образов) принадлежит данная реализация поля, обычно принимается по максимуму апостериорной вероятности. Однако следует отметить, что методов точного решения подобных уравнений пока не существует. Численное же их решение в практических задачах также оказывается невозможным из-за несуразно больших временных и вычислительных затрат. Применение приближенных методов ограничивается высоким порядком дифференциальных уравнений, при этом число уравнений быстро растёт с увеличением числа измеряемых параметров. Кроме того, в случаях стохастического (вероятностного) разделения полей на дискретное множество образов приходится сталкиваться с необходимостью формирования обучающих выборок несуразно больших размеров даже при относительно небольшом числе образов. Так, например, при общем (небольшом) числе алгоритмических констант, равном 20, необходимый размер обучающей выборки при разделении только на два образа (класса) окажется равным примерно 10^6, чего уже вполне достаточно для отказа от использования стохастического подхода, а следовательно, и от решения указанной проблемы, тем более, что ситуация усугубляется отсутствием априорной информации как о реальном числе образов, так и степени информативности признаков.

Выход видится в использовании элементов структурного подхода, согласно которому всё множество пространственных градиентов делится по свойствам измеримости и связности на непересекающиеся подмножества – элементарные составляющие, образующие ортогональный базис [1], [2] и являющиеся способом отражения (формализации) идентификационных признаков реализаций полей. Множество элементарных составляющих определяет, в свою очередь, допустимое множество образов полей. Каждая элементарная составляющая измерима через число её элементарных компонентов и число связей между ними. С помощью структурного подхода можно добиться существенного снижения требований к объёмам обучающих выборок, т.к. каждой конкретной совокупности соответствует существенно меньшее число алгоритмических констант, чем их возможному множеству. Таким образом, решение поставленной научной проблемы возможно в рамках структурно-стохастического принципа аппроксимации виртуального пространства адаптивного управления обработкой информации полей.

Метрология структурно-стохастического принципа управления

Согласно данному принципу пространственно-временное поле можно рассматривать как некоторую случайную функцию следующего вида

$$I(t) \approx \sum_i \{\upsilon_i(t)\} f_i(x,y,t), \qquad i=\overline{1,q}\,, \tag{3}$$

где $\{\upsilon_i(t)\}$ – множество значений весовых коэффициентов i-й элементарной составляющей; $f_i(x,y,t)$ – бинарное изображение i-й элементарной составляющей; q – число составляющих.

Данная модель позволяет реализовать многоуровневый иерархический метод структурного анализа, согласно которому происходит поочерёдное выделение составляющих с одновременным оцениванием их весовых коэффициентов и определением значений идентификационных параметров. В основу построения алгоритмов выделения элементарных составляющих положен принцип логической фильтрации. Результатом работы алгоритмов является принятие решения по каждому элементу поля о его принадлежности к той или иной составляющей. В основу построения алгоритма формирования изображений элементарных составляющих положен принцип объединения бинарных элементов в связные совокупности, который реализуется путем последователь-

ного наращивания множества без учета возможных направлений его распространения, т.е. применением алгоритма перебора в ширину. В основу определения значений идентификационных параметров положен принцип измеримости информации полей. В итоге формируется вектор значений параметров (вектор сообщений).

Обработка пространственно-временного поля производится на каждом такте t_k, т.е. в каждый момент времени поступления очередной реализации поля. По окончании обработки выдается результат в виде некоторого сообщения $a_k = \{n; a_1, ..., a_n\}_k$, где n – число отдельных (парциональных) сообщений. Для всей последовательности реализаций поля может быть построена траектория изменения значений векторов сообщений во времени $a_l(t)$, представляющая, по существу, образ поля. В качестве образа структурно-подобного подмножества полей будет выступать не отдельная траектория, а некоторая их совокупность – трубка близких, в некотором смысле, траекторий A_l. Рассматривая каждую из полученных реализаций как некоторый случайный процесс, естественно использовать в качестве меры близости траекторий вероятностную меру – максимум апостериорной вероятности, обеспечивающий минимум средних потерь.

Априорные вероятностные свойства любой траектории $a_l(t)$ могут быть заданы совместными конечномерными плотностями вероятности в точках ее отсчета

$$P_{a_l(t_1),...,a_l(t_k)}(a_1,...,a_k) = P_{t_1,...,t_k}(a_1,...,a_k). \tag{4}$$

Апостериорную плотность вероятности траектории $a_l(t)$ представим как условную плотность распределения, когда уже получен ряд текущих векторов сообщений $b_1,...,b_k$ в моменты времени $t_1,...,t_k$, в виде формулы Байеса

$$\eta_l \equiv \widetilde{P}_l \equiv \widetilde{P}_l(a_1,...,a_k | b_1,...,b_k) = \\ = \frac{P_l(b_1,...,b_k | a_1,...,a_k)}{P_l(b_1,...,b_k)} P_{t_1,...t_k}(a_1,...,a_k), \tag{5}$$

где $P_l(b_1,...,b_k | a_1,...,a_k)$ имеет смысл условной плотности вероятности распределения значений векторов $b_1,...,b_k$; $P_{t_1,...,t_k}(a_1,...,a_k)$ – совместной плотности вероятности значений векторов $a_1,...,a_k$; $P_l(b_1,...,b_k)$ – совместной плотности вероятности значений векторов $b_1,...,b_k$ на l-траектории.

Совместная плотность вероятности значений векторов $a_1,...,a_k$ и $b_1,...,b_k$ может быть найдена путем интегрирования произведения в числителе соотношения (5) по $a_1,...,a_{k-1}$. Знаменатель соотношения (5) представляет собой безусловную плотность вероятности значений $b_1,...,b_k$, которая может быть найдена путем интегрирования того же произведения по всем $a_1,...,a_k$. Представляя условную плотность, входящую в числитель (5), на основании теоремы умножения вероятностей и выполняя указанные операции интегрирования, получим

$$\widetilde{P}_l(k) = \frac{\int_A \cdots \int_A P_l(b_k | b_1,\ldots,b_{k-1}; a_1,\ldots,a_{k-1},a_k) \times P_l(b_{k-1} | b_1,\ldots,b_{k-2}; a_1,\ldots,a_{k-1}) \times \ldots \times P_l(b_2 | b_1; a_1,a_2) P(b_1 | a_1) P_l(a_1,\ldots,a_{k-1},a_k) da_1 \ldots da_{k-1}}{\int_A \cdots \int_A P_l(b_k | b_1,\ldots,b_{k-1}; a_1,\ldots,a_{k-1},a_k) \times P_l(b_{k-1} | b_1,\ldots,b_{k-2}; a_1,\ldots,a_{k-1}) \times \ldots \times P_l(b_2 | b_1; a_1,a_2) P(b_1 | a_1) P_l(a_1,\ldots,a_{k-1},a_k) da_1 \ldots da_k}. \tag{6}$$

Чтобы упростить последнее соотношение, будем полагать, что между сообщениями, получаемыми в последовательные моменты времени, существует вероятностная взаимосвязь, аппроксимируемая марковским процессом. В результате такой аппроксимации соотношение (6) принимает следующий вид

$$\widetilde{P}_l(k) = \frac{\int_A \dots \int_A P_l(b_k|a_k)P_l(b_{k-1}|a_{k-1}) \times \dots \times P_l(b_2|a_2)P_l(b_1|a_1)P_l(a_1) \times \times P_l(a_k|a_{k-1}) \times \dots \times P_l(a_2|a_1)da_1 \dots da_{k-1}}{\int_A \dots \int_A P_l(b_k|a_k)P_l(b_{k-1}|a_{k-1}) \times \dots \times P_l(b_2|a_2)P_l(b_1|a_1)P_l(a_1) \times \times P_l(a_k|a_{k-1}) \times \dots \times P_l(a_2|a_1)da_1 \dots da_k}. \quad (7)$$

После выполнения ряда преобразований, направленных на устранение операции многомерного интегрирования, получим

$$\eta_l \equiv \widetilde{P}_l(k) = \frac{P_l(k)P_l(b_k|a_k)}{\int\limits_A P_l(k)P_l(b_k|a_k)da_k}, \quad (8)$$

где $P_l(k)$ имеет смысл априорной плотности вероятности принадлежности текущего сообщения траектории $a_l(t)$, а $P_l(b_k|a_k)$ – функции правдоподобия. Результатом выполненных аппроксимаций является стохастическое описание виртуального пространства – стохастические образы структуры векторов сообщений.

Процедура распознавания является составной частью процесса адаптации. Случай перекрывающихся трубок (образов) только подчеркивает стохастический характер задачи, а предложенная стохастическая модель образа структуры векторов сообщений оказывается полностью ему адекватной.

Для отыскания наилучшего значения вектора параметров образов ρ, минимизирующего величину оценки среднего риска $\Re(\rho_k)$ и сходящегося при $k \to \infty$ к значению ρ^*, минимизирующего, в свою очередь, величину самого среднего риска, можно использовать рекуррентное соотношение следующего вида:

$$\rho_k = \rho_{k-1} - D_k^{-1} g(b_k, a_k) \nabla_\rho \eta_l(b_k, \rho_{k-1}). \quad (9)$$

Здесь критерием оптимизации параметров образов служит градиент меры принадлежности $\nabla_\rho \eta_l(b_k, \rho_{k-1})$ к образу ($g(b_k, a_k)$ – функция потерь). Данный критерий оптимизации позволяет существенно ускорить процесс адаптации, особенно в случае перекрывающихся трубок траекторий, не меняя по существу режим распознавания, в котором главным критерием остаётся $MAX\eta_l \equiv MAX\widetilde{P}_l$. Важной новой составляющей процесса адаптации является формирование «следов» текущей траектории – результатов коррекции параметров существующих образов. Это позволяет путем определения меры принадлежности опорной траектории к «следу» и последующего определения градиента меры её принадлежности к опорному и скорректированному образам принять одно из решений: текущая траектория принадлежит трубке (образу) A_l, а ее след A_l' является скорректированным опорным образом A_l; «след» текущей траектории является прообразом и в дальнейшем служит основой для формирования новой трубки траекторий (нового образа).

Следствием взаимного перекрытия трубок траекторий (образов) является изменение уровня (меры) информативности векторов сообщений. Кроме того, в

процессе динамических наблюдений меры информативности элементарных составляющих поля, а соответственно и описывающих эти составляющие векторов сообщений, непрерывно изменяются за счет процесса усиления одних и ослабления других составляющих. В качестве оптимального правила оценки значений мер информативности векторов сообщений, адекватного многокомпонентному характеру реализаций поля и учитывающего существование некоторого закона информативной связи между значениями парциального сообщения $b_j \equiv \{\beta_j^k\}$ в различные моменты времени, можно использовать определение апостериорной плотности вероятности математического ожидания переменной идентификации $\bar{e}_{jl}^k$ в k-й момент времени при условии, что известны аналогичные оценки и значения сообщения β_j во всех предыдущих тактах

$$\hat{\mu}_{jl}^k \equiv \tilde{P}\left(\bar{e}_{jl}^k\right) = P\left(\bar{e}_{jl}^k \mid \bar{e}_{jl}^1,...,\bar{e}_{jl}^{k-1}; \beta_j^1,...,\beta_j^k\right). \quad (10)$$

Вводя марковскую аппроксимацию на последовательное изменение меры информативности сообщения от одного момента времени до другого, получим взаимосвязанную пару рекуррентных соотношений, позволяющую находить оценки мер информативности как в данный момент времени, так и в следующий:

$$\tilde{P}\left(\bar{e}_{jl}^k\right) = \frac{P\left(\bar{e}_{jl}^k\right)P\left(\bar{e}_{jl}^k \mid \beta_j^k\right)}{\int_B P\left(\bar{e}_{jl}^k\right)P\left(\bar{e}_{jl}^k \mid \beta_{jl}^k\right)d\beta}, \quad (11)$$

где

$$P\left(\bar{e}_{jl}^k\right) = \int_E \tilde{P}\left(\bar{e}_{jl}^{k-1}\right)P\left(\bar{e}_{jl}^k \mid \bar{e}_{jl}^{k-1}\right)de\,. \quad (12)$$

Соотношения (11) и (12) обеспечивают возможность построения стохастических образов мер информативности каждой из элементарных составляющих и соответствующих им векторов сообщений. Определение функции правдоподобия $P\left(\bar{e}_{jl}^k \mid \beta_j^k\right)$ осуществлялось исходя из того, что её вид должен соответствовать наихудшему виду функции распределения для каждого из сообщений (диагностических параметров), т.е. виду, приводящему к образованию зон взаимного перекрытия между трубками, к размытию границ между ними (рис. 1). Аппроксимация потока векторов сообщений марковским процессом определяет вид стохастического образа динамики этого потока. Наличие этого образа полностью раскрывает механизм селекции сообщений, что обеспечивает устойчивость режимов обработки информации.

Оценка метрологических параметров структурно-стохастической модели АИРС проводилась как путем моделирования по методу Монте-Карло, так и путем обработки реализации полей реальных физических объектов. Как показали результаты моделирования, способ управления дискриминаторной характеристикой (градиентом меры принадлежности) с ограничением диапазона изменения межтактовой разности функции правдоподобия обеспечивает повышение скорости сходимости почти в 1,5 раза в случае двух соприкасающихся трубок траекторий и числе идентификационных параметров по каждой элементарной составляющей (число составляющих 5), равном 5. Радикальное улучшение условий адаптации в случае соприкасающихся трубок траекторий достигается при использовании способа управления с ограничением в сочетании с управляемым выбором корректирующих коэффициентов в рекуррентном соотношении (9). Исследование скорости сходимости при различных условиях взаимного перекрытия трубок траекторий показало, что ухудшение сходимости до некоторых пределов почти пропорционально увеличению степени перекрытия, после чего сходимость просто не достигается (кривая 4 на рис. 2).

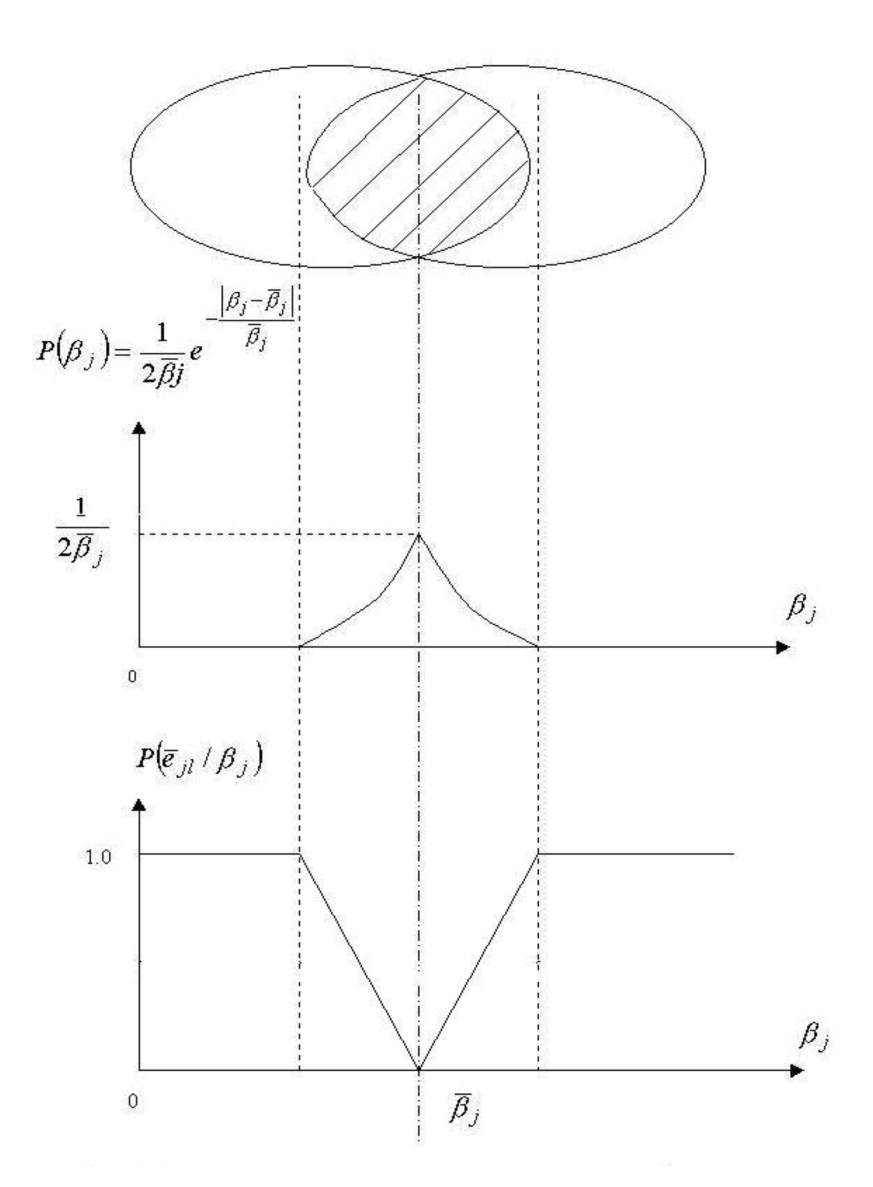


Рисунок 1 – Функции распределения и правдоподобия в зоне перекрытия

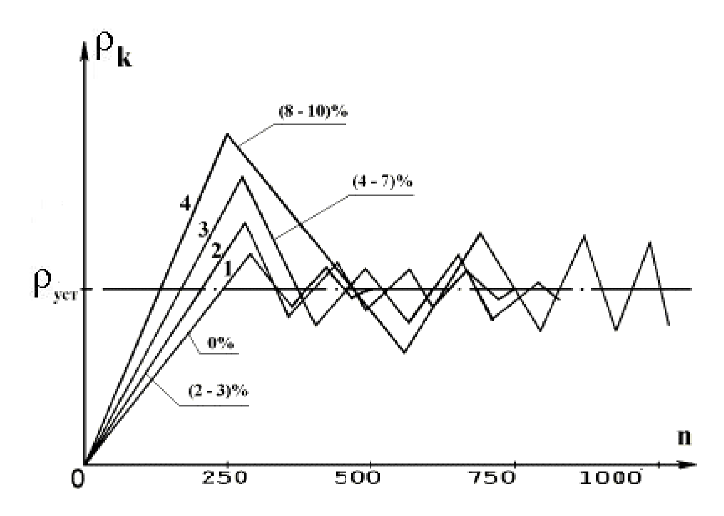


Рисунок 2 – Зависимость сходимости от степени перекрытия трубок траекторий

Использование стохастического образа мер информативности для управления адаптацией в случае перекрывающихся трубок траекторий сводится к информативному «взвешиванию» стохастического образа структуры векторов сообщений путем умножения его на $P\left(E_l^k\right)$. В таком случае

$$\nabla \eta_{k,k-1} = P\left(E_l^k\right) P_l(k) \Delta P_l\left(b|a\right)_{k,k-1} \tag{13}$$

Тогда, с учетом влияния $P_l\left(k\right)$ и имеющего нормальное распределение $P\left(E_l^k\right)$ с $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$, дискриминаторные характеристики имеют вид, представленный на рис. 3. Введение пороговых ограничений по $\Delta P_l\left(b|a\right)$ предотвращает образование ложных следов траекторий, делающих процесс адаптации практически невозможным. Как показали результаты моделирования, учет меры информативности приводит к заметному ускорению сходимости в условиях взаимного перекрытия трубок траекторий, причем способ порогового ограничения векторов сообщений по мере информативности эффективен в широком диапазоне возможных уровней перекрытия. Проведенный анализ показал также, что для интенсивных потоков, содержащих большое число элементарных компонент, эффективно управление, связанное с селекцией векторов сообщений по информативности. Наличие в составе трубок неверно отнесенных к ним траекторий (погрешности адаптации) изменяет крутизну дискриминаторной характеристики, а следовательно, снижает скорость сходимости.

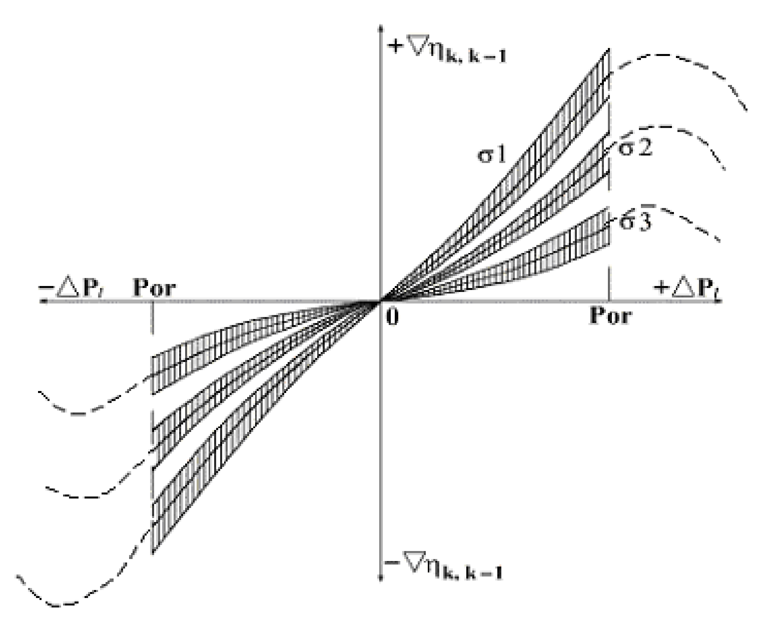


Рисунок 3 – Дискриминаторные характеристики

Вероятность ошибки распознавания с учетом погрешностей адаптации определяется следующим соотношением:

$$\widetilde{P}_{ош} = \frac{1}{2}\left(1 - |2P-1|\right) + |2P-1| P_{ош}, \tag{14}$$

где $P_{ош}$ – вероятность ошибки при отсутствии погрешности адаптации;

P – вероятность безошибочной адаптации.

Данная зависимость представлена на рис. 4.

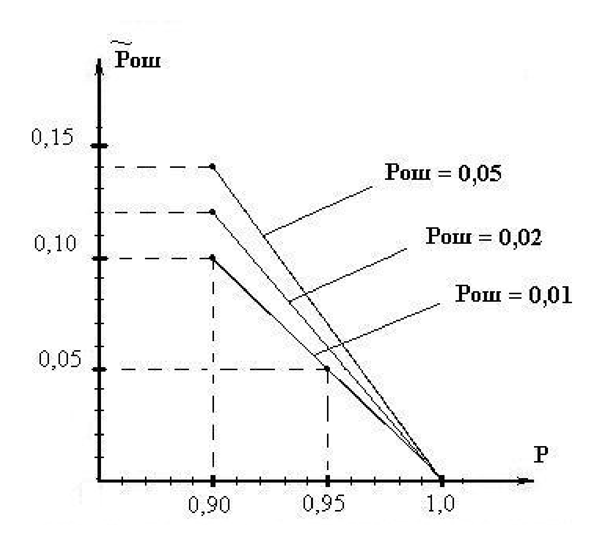


Рисунок 4 – Зависимость достоверности распознавания от погрешности адаптации

Вводя в рассмотрение стохастический образ параметра семейства законов распределения векторов сообщений и используя рекуррентное соотношение (9), можно найти оптимальные значения параметров данного образа для каждой трубки и для каждого такта траектории. В процессе моделирования данного режима было установлено улучшение сходимости в среднем примерно на 20 % и повышение устойчивости достоверности результатов (уменьшение вероятности ошибки) почти на 15 %.

К наиболее реальным способам практической реализации АИРС можно отнести чисто программный и аппаратурно-программный с использованием микропроцессорных комплектов [3]. Эксперименты по использованию АИРС для решения задач ранней диагностики опухолевых заболеваний молочной железы при проведении массовых профилактических обследований показали, что в результате адаптации обучающая выборка пространственно-временных тепловых полей оказалась разделенной на три существенные с точки зрения конечного результата трубки траекторий (рис. 5) мер принадлежности: трубка 1 – соответствует классу нормы, 2 – мастопатии, 3 – подозрению на рак. Использование результатов адаптации позволило почти на 20 % поднять достоверность термографической диагностики и приблизить ее к 90 %.

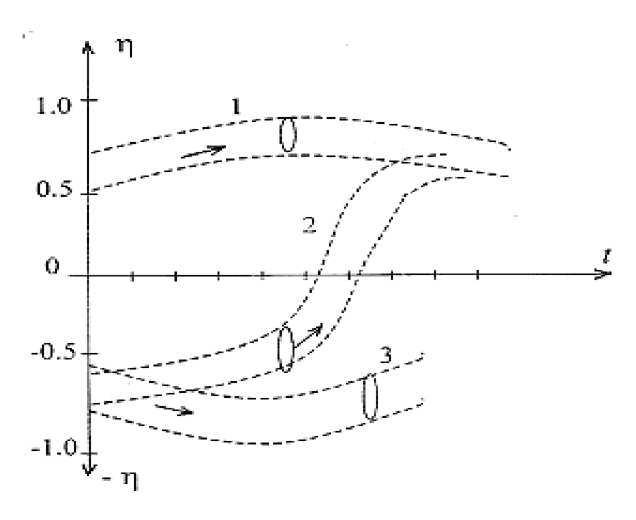


Рисунок 5 – Трубки траекторий мер принадлежности

Вывод

Предложенные системные принципы метрологического обеспечения структурно-стохастического управления обработкой информации пространственно-временных полей позволяют создавать адаптивные информационно-распознающие системы, способные функционировать в условиях значительной априорной неопределенности и пересекаемости образов полей, обеспечивая тем самым высокие уровни достоверности и устойчивости результатов, а также существенное ускорение процессов приобретения новых знаний о связях между состояниями исследуемых объектов и их физическими полями.

Литература

1. Анцыферов С.С. Формирование спектра тепловых изображений объектов и распознавание их образов // Оптический журнал. – 1999. – Т. 66, № 12. – С. 44-48.
2. Antsyferov S.S. Forming the spectrum of thermal images of objects and recognizing their patterns // J. Opt.Technol. – 1999. – V. 66(12). – P. 1047-1049.
3. Анцыферов С.С., Евтихиев Н.Н. Адаптивные системы распознавания образов пространственно-временных полей // Искусственный интеллект. – 2004. – № 3. – С. 405-416.

С.С. Анциферов
Метрологія інтелектуальних систем
У статті розглянуті системні принципи метрологічного забезпечення проектування систем з елементами штучного інтелекту. Структурно-стохастичний принцип апроксимації інформації просторово-часових полів забезпечує подолання істотної апріорної невизначеності і високі метрологічні показники швидкості адаптації, достовірності і стійкості результатів.

S.S. Antsyferov
Metrology of Intellectual Systems
The system principles of metrological assurance of intellectual systems designing, i.e. the systems with elements of an artificial intelligence are considered. The structurally-stochastic principle of approximation ensures overcoming of essential a priori indeterminacy and assures high metrology parameters on a velocity of adaptation, reliability of results.

Статья поступила в редакцию 10.07.2008.